

LHDに見るプラズマ制御技術

山田弘司

総合研究大学院大学教授核融合科学専攻／自然科学研究機構核融合科学研究所教授

高温プラズマを容器に閉じ込めようとすると、エネルギーの損失が起きる。これを最小限に抑えて「制御」する。LHDには高度な物理設計と技術開発が求められた。

われわれが研究している核融合は、正確には「制御熱核融合」と呼ばれる。水爆のような「制御されていない」熱核融合や、太陽や星での自然に自律した熱核融合とはまったく異なるからである。

制御熱核融合では、1億度という超高温プラズマを一定時間閉じ込めておかなければならない。ところが、プラズマという流体は、ふつうの流体のようにうねったり渦巻いたりときさまぎまな形態を取るだけでなく、電気を帯びているために電磁場の作用が加わり、より複雑な集団現象としての不安定性が生じる。核融合反応を起こすために必要とされる閉じ込め性能を実現するためには、この不安

定性を制御することが求められる。

磁場のかごを織りなす工夫

プラズマの閉じ込め性能という概念は、容器に水を貯めることにたとえられるだろう。ざるは穴だらけで水を貯めることはできないが、穴が小さければ、水位はゆっくり下がっていき、一定の時間水を貯めておくことができる。この水位が下がっていく特徴的時間を閉じ込め時間と呼ぶ。水漏れが大きい、つまり閉じ込め性能が悪いと、外から水を補給してやらなければならない。

プラズマの場合は水のかわりに熱を閉じ込めておくのだから、閉じ込め性能が

悪いと、温度を維持するために外から加熱してやる必要がある。この加熱のためのエネルギーが大きいと、核融合反応によって得られるエネルギーとの損得勘定で十分な儲けが得られない。やっかいなことに、プラズマには温度が上昇すると漏れを自分で大きくする性質があり、少しくらい閉じ込めがよくても温度が上がると自分勝手にエネルギーを失って温度を下げようとする。これが核融合研究者の悩みの種である。

では、プラズマはどのようにして閉じ込めるのだろうか。現在、もっとも盛んに研究されているのは、磁場の圧力を用いる方法である。荷電粒子であるプラズ

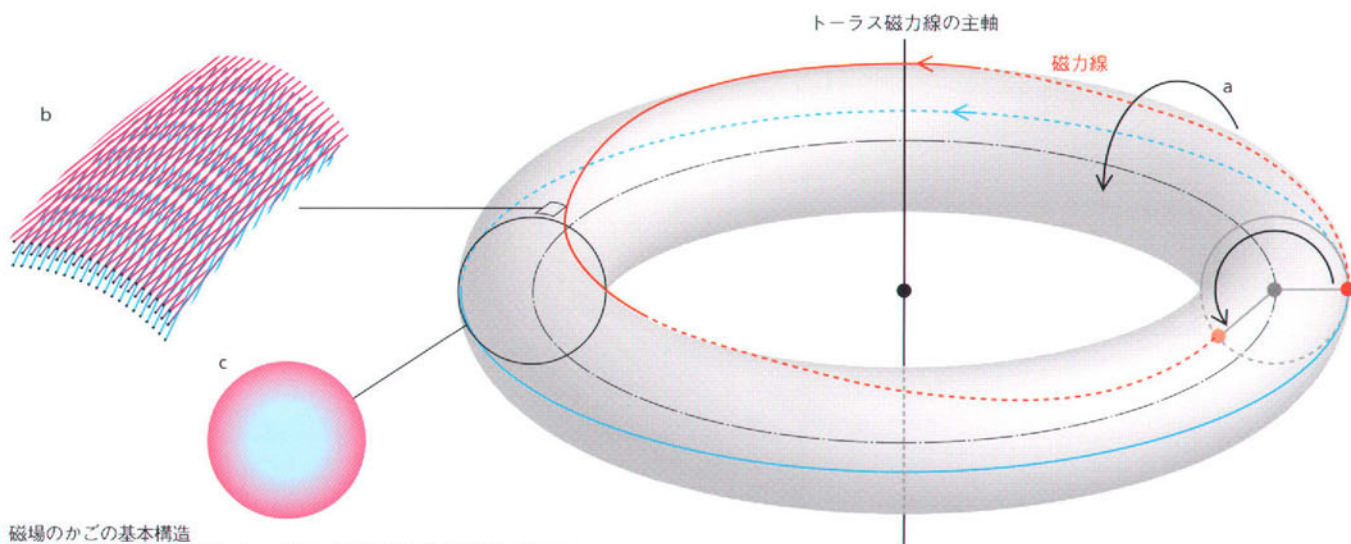


図1 磁場のかごの基本構造

- (a) 磁力線に、単純な青線ではなく、赤線のような捻れ(回転変換)を与える。
- (b) 磁気面ごとに磁力線の捻れ具合を変化させる(シア)。
- (c) トラス一周の平均として磁場の強さを外側ほど大きくする(磁気井戸)。

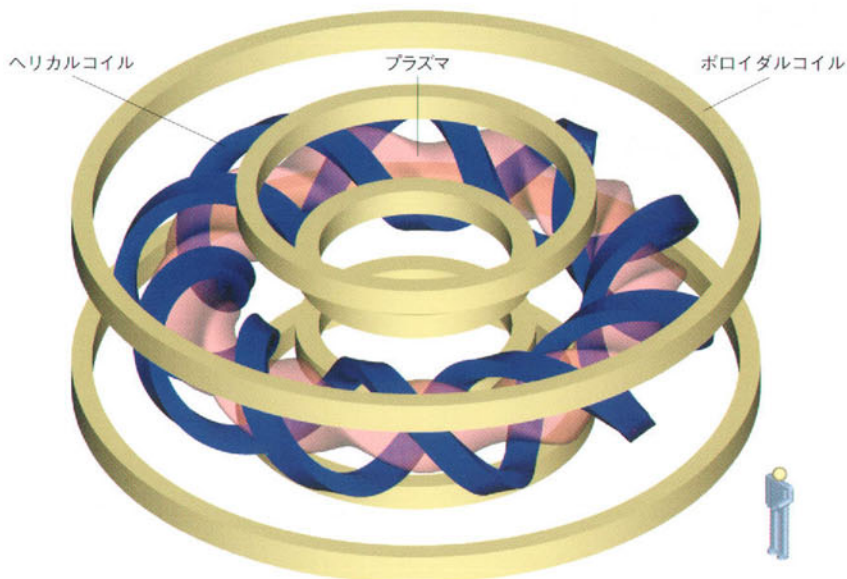


図2 LHDの超伝導磁石と閉じ込められたドーナツ状のプラズマ

マは磁力線に巻きついて運動するので、ドーナツ状（トーラスという）に磁力線を閉じてやれば、そこから逃げないであろうという考え方である。しかし実際には、集団的な振る舞いとしての不安定性によってプラズマは逃げようとする。エントロピーを増大させたがるのは自然の摂理である。

大型ヘリカル装置（LHD）の場合、そこに閉じ込められた高温プラズマの運動エネルギーは10トントラックが時速60kmで走っているのと同じである。これをわずか1mgの気体（プラズマ）が担っているわけで、まさにパワフルなじゃじゃ馬といったところである。このようなエネルギーをプラズマを目に見えない磁場のかごで閉じ込めようとしているのである。竹のかごは縦横にひごを織りなして作るが、磁場のかごでは以下の三つの重要な工夫をする。

① 磁力線をトーラスに沿って単純な円をつなぐのではなく、捻れを加える。これを「回転変換」という。これによってプラズマを外に押し出そうとする遠心力をうまくキャンセルすることができる（図1a）。

② 磁力線の捻れぐあいをかごの中心から外側に向かって変化させる。これを「ずり」または「シア」という。こうすると、かごの隙間を小さくすることが

できる（図1b）。

③ 磁場をかごの中心から外側に向かって強くなっていくようにする。これを「磁気井戸」という。不安定性が起こってプラズマが外へ行こうとしても、外側の磁場の圧力が大きければ押し戻され、不安定性は成長しない（図1c）。

このようなトーラス磁場に対する基本的な要請はトカマク型においてもヘリカル型においてもほぼ同じであるが、LHDではさらに独自の技術が開発された。

最先端技術に匠の技を加えて

LHDは、図2に示すように超伝導電磁石によってプラズマを閉じ込める磁場の容器をつくりだす。最も本質的な構造は、1対のらせん状の電磁石（ヘリカルコイル）である。これに加えて、独立に制御することのできる6種類の電磁石（ポロイダルコイル）を備えており、磁場のかごの形を変えるなど、実験にいろいろな試みをする余地と、柔軟性をもたせている。このような磁場構造をもつ方式は「ヘリカルヘリオトロン」と呼ばれ、わが国独自のアイデアである。これらのコイル全体で磁場の発生する蓄積エネルギーは0.9ギガジュールと、世界最大の超伝導電磁石である。

このように磁場のかごは巧みに工夫されたものであるから、磁場が乱れるとブ

ラズマは隙を見つけて逃げ出そうとする。それを防ぐため電磁石には±2mmの精度が要求された。LHDのトーラス部分の直径は約10mであるから、5000分の1の公差である。またプラズマを閉じ込める部分で強度3テスラの磁場（磁場の圧力として36気圧に相当）を発生させるために大電流を電磁石に流すが、これによって生じる電磁力は1m当たり1000トンにも及ぶ。さらに、超伝導状態にするために電磁石を零下269度まで冷却するが、これによるヘリカルコイルの縮みは全体として20mm程度ある。このような過酷な運転条件下で精度2mmを保たなければならぬのである。

一つのヘリカルコイルは超伝導ケーブルを450周も巻いて作るため、1本のケーブルの設置精度はなんと100分の6mmにもなる。この巻き線作業は大型ヘリカル実験棟内において、専用開発した13の制御軸をもつ巻き線機を使って、レーザー距離計で位置を確認しながら行った。それでも、最後の仕上げは技術者が楔を木槌で叩き、その感触で精度を確かめると言う人間業が必要であった。まさに最先端の技術と最高の匠の技の結晶である。

ところで磁場のかごを直接見ることはできないが、電子ビームを使ってその存在を可視化することができる。LHDの真空容器中に蛍光塗料を塗った細かい網を置き、磁力線に沿って電子を走らせると、その一部が網に衝突して蛍光材を光らせる。電子は捻れた磁力線に沿って何周も回りながら次々と蛍光材を光らせて

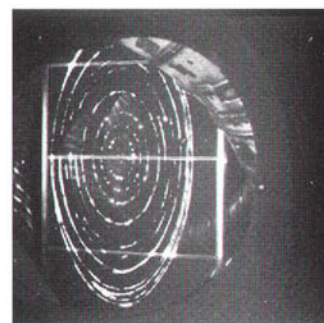


図3 LHDの磁場のかごの断面。磁力線に沿って走る電子が蛍光材を光らせている。

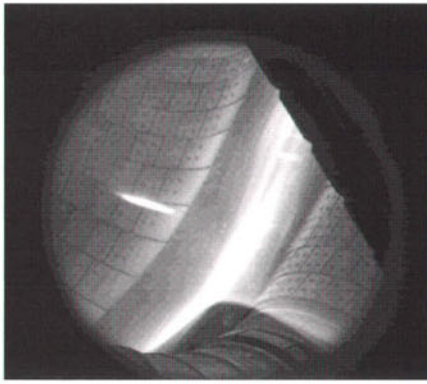
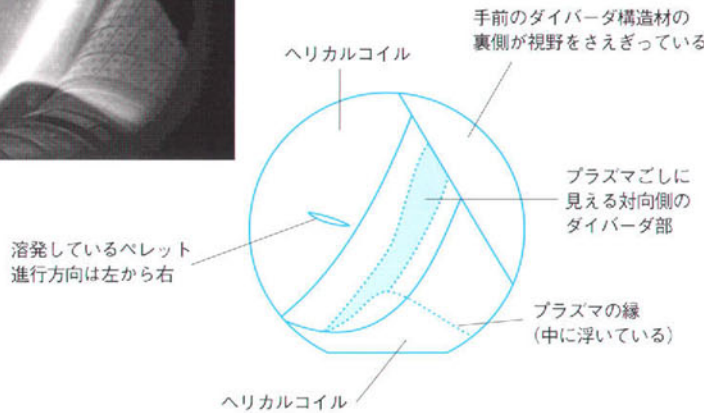


図4 LHDプラズマに打ち込まれた水素の氷の弾丸(ペレット)が溶けている様子。



かごの断面を浮かび上がらせる。その結果を図3に示す。入れ子状のかごができていることがお分かりいただけるであろう。電磁石の製作精度については、機械測定はもちろんのこと、このように磁力線構造を直接検査する作業を通じても確認された。

こうして、前述した閉じ込め容器の条件すべてを理想的に満足するところまではいかないが、総合的に見て優れた磁場のかごを発生することができた。実際、これまでの実験によって、理想電磁流体線形理論からは不安定になると予測される場合においても、不安定性が閉じ込めの劣化を招くほど成長せず、この理論の予測する限界を超えた高いベータ値(磁場の圧力に対するプラズマの圧力の割合)のプラズマを閉じ込められることが実証された。これは今後のヘリカル型磁場閉じ込

め方式の展望を明るくするとともに、電磁流体力学理論モデルの新たな発展を喚起する大きな成果である。

燃料補給と排気の制御

核融合反応は「燃える」と表現されるように、燃料である水素の同位体(重水素や三重水素)がヘリウムに変換されて灰となる反応である。普通の化学燃焼の制御と同じく、この燃料と灰の出し入れも大事な制御の対象である。

燃料となる水素は気体のガスとしてプラズマの外から供給することが簡便であるが、この場合、プラズマの最表面で電離され、中に入っていくものよりもすぐに外へ逃げてしまうものの方が多い。このため燃料補給効率が悪く、また余剰の中性ガスがプラズマの不安定性を誘起したり高温プラズマの荷電交換を誘発し

てプラズマに対向した構造物の壁を損傷したりする。

これに対して現在期待されているのは、零下260度程度で凍らせた水素の氷を弾丸(ペレット)にしてプラズマへ打ち込む方法である。この場合、水素の氷は閉じ込め領域の奥深くで溶けてプラズマとなるため、効率が非常に高くなる。図4はLHDプラズマに打ち込まれた水素ペレットが溶発する様子を示している。このような固体水素ペレットを生成し、連続的に射出する技術はほぼ完成されている。

燃料補給については、プラズマの閉じ込めが悪ければたくさん入れてたくさん出すようにしなければならず、プラズマ閉じ込め性能と深く関わっている。

このとき燃料である水素同位体以外の元素が混入すると、燃料の希釈と輻射の増大によるエネルギー損失がエネルギー収支を悪化させる。核融合の研究では燃料以外の元素を不純物と呼んでおり、できる限り不純物の混入を抑えること、入ってしまったらそれを排気することも必要となる。

LHDでは、磁場のかごのもっとも外側の磁力線を外へ引き出すことによって排気を行う。この仕組みを「ダイバータ」と呼ぶ。ダイバータは高温プラズマの最終処分場として高い熱負荷がかかるため、高融点の材料を使うなどのさまざまな工夫が必要とされている。そのためダイバータに入ってきたプラズマをガスで冷やして熱負荷を下げるという制御方法も試みられている。

磁場に閉じ込められたプラズマでは空間対称性が成り立ちにくく、異なった物理量の干渉と結合が大きい。このため、制御する対象(入力)と結果(出力)が必ずしも直接的に結びついていない(風が吹いたら桶屋が儲かるというたとえに似ている)。実用化技術にしばしば見られるような、制御のための関数がブラックボックスであっても実用上問題はない、という戦略が核融合プラズマの制御ではなかなかとりにくい。このことを十分認識して対策を立てることがじゃじゃ馬を乗りこなす秘訣である。



山田弘司(やまだ・ひろし)

物理、宇宙好き少年が、手に取れて未来を明るくする核融合に惹かれ、早研究生活は20年を越えた。息の長いアプローチが必要なこの研究は、これから正念場であり、今の世代は僅差(もちろんリードしている)で終盤を迎えつつあるセットアッパーと言ったところだ。それを楽しみつつ、好奇心を持って新しい領域へ、いろんな人との協力を力として挑戦していきたい。総研大世代の諸君は当然、クローザーだ。期待している。